

doi:10.3788/gzxb20164506.0631001

# 光控-晶控相结合的膜厚监控法对滤光片膜厚的研究

张学典<sup>1,2</sup>, 钱研华<sup>1</sup>, 常敏<sup>1,2</sup>, 江旻珊<sup>1,2</sup>

(1 上海理工大学 光电信息与计算机工程, 上海 200093)

(2 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

**摘 要:**针对光电极值法和石英晶振法各自的弊端,结合两种方法提出了光控-晶控膜厚监控法.在相同工艺条件下,分别使用这三种方法监控 905 nm 窄带滤光片(规整膜系)和 830 nm 截止滤光片(非规整膜系)的膜厚,对制备的滤光片的透射率光谱曲线进行比较.结果表明,光控-晶控膜厚监控法除了各项指标都符合要求外,在曲线通带处获得的平均透过率值比光电极值法和石英晶振法获得的平均透过率值提高了 3%~6%,且与理论光谱基本吻合,光谱特性最好.该方法不仅对规整和非规整膜系都能进行监控,且能有效降低膜厚误差,提高光谱特性.

**关键词:**规整膜系;非规整膜系;光控-晶控;滤光片;光电极值法;石英晶振法;透射率

中图分类号:O484

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)06-0631001-6

## Monitoring Method for Filter Film Thickness Based on the Combination of Photoelectric Extreme Value and Quartz Crystal Oscillation

ZHANG Xue-dian<sup>1,2</sup>, QIAN Yan-hua<sup>1,2</sup>, CHANG Min<sup>1,2</sup>, JIANG Min-shan<sup>1,2</sup>

(1 College of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2 Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** According to the disadvantages of both photoelectric extreme value and quartz crystal oscillation methods, a combination method based on photoelectric and quartz control were presented. To evaluate the performance of the combination method, the films with coating thickness of 905 nm narrow band filter (quarter wave coatings) and 830nm cutoff filter (non-quarter wave coatings) were monitored using the combination method and individual method respectively under the same process. The combination method shows better performance, compared to the case of using an individual method. From the spectral transmittance curves of filters, the average transmittance values in the pass bands increase by 3%~6% by using the combination method. Meanwhile, the transmittance curve achieved by the combination method consists well with the theoretical spectral curve. The results show that this method can not only monitors quarter wave coatings and non-quarter wave coatings, but also effectively reduce the monitoring error and improve the spectral characteristics.

**Key words:** Quarter wave coatings; Non-quarter wave coatings; Photoelectric-quartz control; Filters; Photoelectric extreme value method; Quartz crystal oscillation method; Transmittance value

**OCIS Codes:** 310.4165; 310.5696; 310.6188; 310.6860; 310.6805

基金项目:国家重大仪器专项(Nos. 2014YQ09070903, 2013YQ03065104)和国家高技术研究发展计划(No. 2015AA020401)

第一作者:张学典(1974-),男,教授,博士,主要研究方向为光电检测技术与仪器. Email:zhangxuedian@hotmail.com

通讯作者:钱研华(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为光电检测技术. Email:qianyanhua06@126.com

收稿日期:2015-12-08;录用日期:2016-01-30

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

近年来,光学镜头、光学仪器、数码产品等的广泛应用和大量需求,使得人们对光学零部件镀膜的光学特性和准确度的要求也越来越高<sup>[1]</sup>.薄膜厚度的监控通常采用光电极值法和石英晶体振荡法<sup>[2-4]</sup>.其中,光电极值法有对膜系厚度误差进行自动补偿的优点,但是它在极值点附近的光信号对薄膜厚度变化不灵敏,且只能监控1/4波长及其整数倍厚度的膜层(即规整膜系),准确度有限<sup>[5-6]</sup>.石英晶体振荡法的优点是可以测量任意厚度的膜系,但是它只能测量几何厚度,且没有自动补偿功能<sup>[7]</sup>.目前,基于光电极值法和石英晶振法有一定的互补性,国内外中高档次的镀膜设备均同时配备这两种系统<sup>[1]</sup>,但是这种镀膜设备的价位比较高.为了克服这两种方法各自的缺点,保留它们的优点,本文将两种方法结合起来,提出基于光电极值法和石英晶体振荡法相结合的薄膜监控法,即光控-晶控膜厚监控法.并采用该方法对窄带滤光片<sup>[8-10]</sup>和截止滤光片<sup>[9]</sup>的膜厚进行监控研究.

## 1 膜厚监控方法

### 1.1 光电极值法监控膜厚

光电极值法直接监控膜层的光学厚度,它是在光电接收系统监控薄膜制备过程中,利用膜层的厚度变化而引起的透射比和反射比的变化来监控膜层厚度.

以单层膜为例,如图1.为方便计算,假定入射光

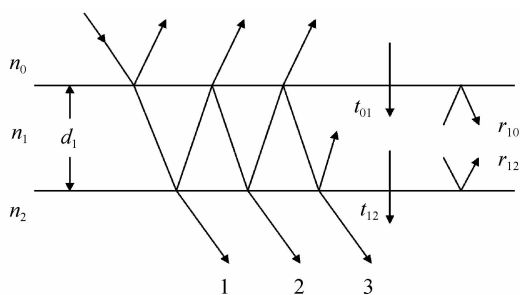


图1 光在薄膜中的多次反射

Fig. 1 Multiple reflections of light in thin films

为单振幅为1,考虑到参与叠加的各光波之间具有相干性,透射波的合成波的合成透过系数为 $E_t$ ,应用无穷级数可表为

$$E_t = t_{01} t_{12} e^{-i\delta_1} + t_{01} t_{12} r_{12} r_{10} e^{-i3\delta_1} + t_{01} t_{12} r_{12}^2 r_{10}^2 e^{-i5\delta_1} + \dots \quad (1)$$

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \quad (2)$$

式(1)中,等号右边的每一项相当于一束光的振幅,其中 $t_{01} t_{12} e^{-i\delta_1}$ 相当于光束1, $t_{01} t_{12} r_{12} r_{10} e^{-i3\delta_1}$ 相当于光束2,以此类推.该无穷级数是公比为 $r_{12} r_{10} e^{-i2\delta_1}$ 的等比级数,故等比级数求和后的得到透射波的合振幅为

$$E_t = \frac{t_{01} t_{12} e^{-i\delta_1}}{1 - r_{12} r_{10} e^{-i2\delta_1}} \quad (3)$$

故透过率为

$$T = \frac{n_2}{n_0} |E_t|^2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{t^2}{1 + r^2 - 2r \cos 2\delta_1} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{t^2}{1 + r^2 - 2r \cos (4\pi n_1 d_1 / \lambda)} \quad (4)$$

式中, $t = t_{01} t_{12}$ , $r = r_{12} r_{10}$ ,即透射光强度为薄膜光学厚度 $n_1 d_1$ 的函数.当光学厚度 $n_1 d_1$ 为 $\lambda/4$ 的整数倍时(即相位厚度 $\delta_1$ 为 $\pi/2$ 的整数倍),透射率出现极值,同理可求得反射光强度<sup>[11]</sup>.通过透过率(或反射率)出现极值的次数来判别光学薄膜的沉积厚度<sup>[12]</sup>.

使用光电极值法监控薄膜的厚度,最大的优点是相邻膜层之间具有自动补偿功能.然而,在极值点处光学厚度的变化是一个微小量, $\Delta nd$ 由此引起的透射率(或反射率)的变化量也是一个微小量,即 $\Delta T / \Delta nd$ 在极值点附近很小,接近于零,如图2,此时透射率(或反射率)对厚度的变化最不灵敏,将导致薄膜监控的准确度降低,这正是极值法的固有缺陷<sup>[13]</sup>.同时,光电极值法对于非1/4波长厚度(即非规整膜系)的监控误差更大,故不宜使用光电极值法来监控非规整膜系.

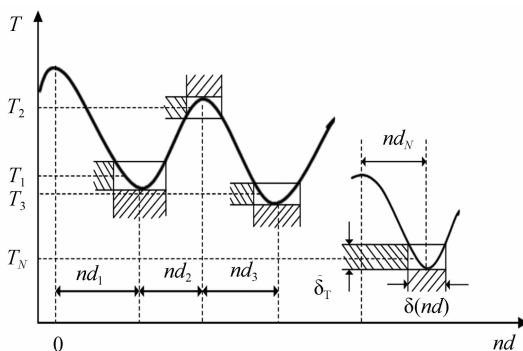


图2 光电极值法极值点附近灵敏度低

Fig. 2 Low sensitivity of the photoelectric extremum method in the extreme point

### 1.2 石英晶振法监控膜厚

石英晶体振荡监控法主要利用石英晶体的压电效应来完成膜厚监控的工作.

石英晶体压电效应的固有频率与晶体厚度的关系为

$$f_Q = \frac{N}{d} \quad (5)$$

式中, $f_Q$ 为石英晶体的固有谐振频率(基频), $N$ 为频率常量,其值为 $1\ 670\ \text{kHz} \cdot \text{mm}$ , $d$ 为晶体厚度<sup>[4]</sup>.对其微分,则有

$$\Delta f_Q = -\frac{N \Delta d}{d^2} \quad (6)$$

式中,“-”号表示频率随厚度增加而减小.利用式(7)可以把石英晶体的几何厚度增加量 $\Delta d$ 变换成薄膜几何厚度的增加量 $\Delta d_M$ ,即

$$\Delta m = A \rho_M \Delta d_M = A \rho_Q \Delta d \quad (7)$$

式中,  $A$  为被镀膜面积,  $\rho_M$  为薄膜密度,  $P_Q = 2.65 \text{ g/cm}^3$  为石英晶体密度. 可以得到

$$\Delta d = \frac{\rho_M \Delta d_M}{\rho_Q} \quad (8)$$

$$\Delta f_Q = -\frac{\rho_M}{\rho_Q} \cdot \frac{f_Q^2}{N} \Delta d_M \quad (9)$$

根据式(9), 已知  $f_Q$  为石英晶体的基频, 对于既定材料其  $\rho_M$  是已知的, 故在膜层不是很厚且基频变化不是很大的时候,  $-\frac{\rho_M}{\rho_Q} \cdot \frac{f_Q^2}{N}$  可近似看成常量, 膜厚变化  $\Delta d_M$  与晶体的频率变化  $\Delta f_Q$  近似呈线性关系, 可以通过监测石英晶体频率的变化, 实现对膜厚的监测<sup>[14]</sup>.

石英晶振法监控薄膜厚度, 最大的优点是便于自动控制并且可以监控任意膜厚, 但是它测得的是几何厚度而不是光学厚度, 且随着薄膜厚度的增加, 晶体的灵敏度会不断下降, 为保证振荡稳定和较高的灵敏度, 晶体上的膜层厚度增加到一定程度后要进行清洗或更换晶片<sup>[15]</sup>. 同时, 它还缺少光电极值法自动补偿的功能, 这使得它在很多应用中受限.

### 1.3 基于光控-晶控相结合的膜厚监控法

为了克服光电极值法和石英晶振法各自的弊端, 采用光电极值法和石英晶振法相结合的膜厚监控法来监控窄带滤光片和截止滤光片的膜厚. 通常情况下, 滤光片的膜系都是由高低折射率材料交替镀制的, 在这种条件下, 光电极值法非常适合, 考虑到光电极值法监控非规整膜系的弊端, 本文只在前两层采用光电极值法监控膜厚(包括高、低折射率材料镀制的膜各一层), 而将光电极值法监控时所得的晶控厚度  $M_H$  和  $M_L$  作为下一步石英晶振法监控的模板, 进一步采用石英晶振法监控其余膜层的厚度. 光控-晶控相结合的方法可充分发挥光控和晶控两种方法各自的优势, 既能实现非规整膜系的监控又能保证一定的测量准确度.

光控-晶控膜厚监控法监控滤光片的成型过程的操作步骤为:

1) 首先向计算机输入需要的镀膜参量, 包括高折射率材料折射率  $n_H$ 、低折射率材料折射率  $n_L$ 、入射介质折射率  $n_A$ 、基底折射率  $n_S$ 、中心波长  $\lambda_0$ 、所需镀膜膜系以及总膜层数  $k$  等.

2) 计算机根据输入的镀膜参量, 给出所镀膜系的监控表, 第 1、2 层采用光电极值法进行监控, 其余膜层都采用石英晶振法监控, 算出相应膜层的监控波长  $\lambda_i$ 、理论极值  $E_{iT}$  及晶控系数  $R_i$ .

3) 开始镀膜:

①令第 1 层膜的实际极值为  $E_{1A} = 0$ , 将单色波波长调节至监控波长  $\lambda_1$  镀制第 1 层膜, 得到该层膜的实际极值为  $E_{11A} = E_{1A} + 1$ , 当第 1 层膜的实际极值  $E_{1A}$  和

其理论极值  $E_{1T}$  相等时, 停止镀膜, 计算机采集晶控仪上显示的晶控厚度  $M_H$ , 第 1 层膜镀制结束;

②令第 2 层膜的实际极值为  $E_{2A} = 0$ , 将单色波波长调节至监控波长  $\lambda_2$  镀制第 2 层膜, 得到该层膜的实际极值为  $E_{2A} = E_{2A} + 1$ , 当第 2 层膜的实际极值  $E_{2A}$  和其理论极值  $E_{2T}$  相等时, 停止镀膜, 计算机采集晶控仪上显示的晶控厚度  $M_L$ , 第 2 层膜镀制结束;

③当镀制第  $i$  层膜时,  $i = 3$ : 若前层为高折射率材料, 则当晶控仪显示的膜层厚度为  $M_{iA} = R_i \times M_H$  时, 停止镀膜; 若前层为低折射率材料, 则当晶控仪显示的膜层厚  $M_{iA} = R_i \times M_L$  时, 停止镀膜;

④  $i = i + 1$ , 重复步骤③, 直到  $i = k$ , 则所有膜层镀制结束<sup>[16]</sup>.

其中, 对于规整膜系,  $\lambda_1 = \lambda_2$ , 而对于非规整膜系, 为了减少由于材料色散引起的厚度控制误差, 需调整监控波长, 故  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ .

分析可知: 光控-晶控监控法能有效综合光电极值法和石英晶体振荡法的优点, 克服单独使用光电极值法监控非规整膜系时误差大和单独使用石英晶体振荡仪的工具因子易受膜层沉积参量的影响, 该方法可对规整膜系和非规整膜系进行监控, 能提高整体透过率, 降低膜厚监控误差, 提高薄膜的光谱特性.

## 2 实验结果与分析

实验中, 采用氧化钽 ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) 作为高折射率材料, 二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 作为低折射率材料, 两种材料交替镀制滤光片<sup>[9]</sup>, 则  $n_H = 2.16$ ;  $n_L = 1.46$ ;  $n_A = 1$ ; 基底为 BK7 玻璃, 则  $n_S = 1.52$ . 对于规整膜系和非规整膜系, 都采用磁控溅射镀膜机 (OCS1000) 设备镀制, 晶控仪采用 XDM-3K.

OCS1000 的仪器框图如图 3, 该镀膜机采用双光路系统, 由计算机控制激光器发出一定波长范围的光,

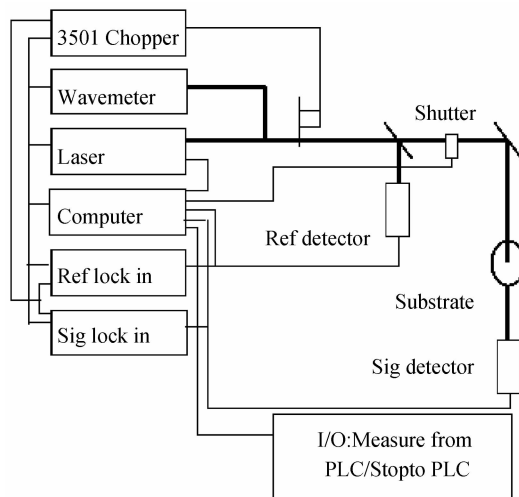


图 3 OCS1000 的仪器框图

Fig. 3 Instrumentation Block Diagram of OCS1000

通过波长计后得到所需的单波长,再经过 3501 斩波器把光波调制成脉冲波,最后得到一束参考光和一束经过基质的信号光,再分别经过 SR830 数字锁相放大器,得到两束对比光进入计算机. 经过计算机对数据的处理得出滤光片的透过率,通过透过率的变化来控制膜厚.

在制备 905nm 窄带滤光片(规整膜系)的过程中,对于 750 nm 以下的光谱,使用型号为 HB750 的有色玻璃截止(即基底有 BK7 玻璃换成了 HB750 有色玻璃),而对于 750~850 nm 之间的光谱还需要镀制一个长波通辅助膜系将光截止掉,于是便设计了 830 nm 长波通截止滤光片(非规整膜系).

### 2.1 规整膜系实验及结果分析

用光学薄膜设计软件设计一个 25 层的规整膜系的结构,即  $S/(HL)^2 H 2LH (LH)^2 L (HL)^2 H 2L H (LH)^2/A^{[17]}$ ,图 4 是在相同工艺条件下,分别采用光电极值法、石英晶振法和光控-晶控监控法(P&Q)监控中心波长为 905 nm 的窄带滤光片成型过程所得到的透射率光谱曲线.

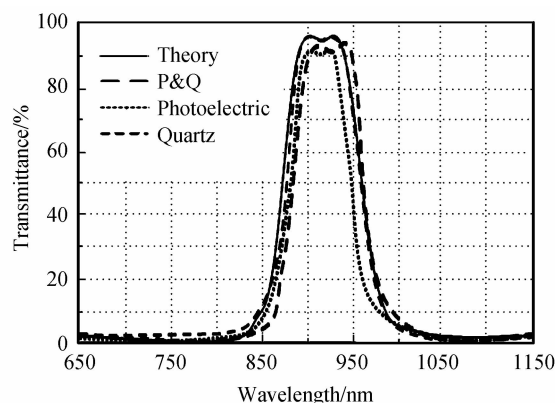


图 4 3 种方法监控规整膜系(905 nm 窄带滤光片)膜厚的透射率曲线

Fig. 4 Theoretical and measured transmittance curves of the film with quarter wave coatings(905nm narrow band filter) monitored by three methods

对比可以发现光电极值法的平均透过率(只指通带处,下同)接近 89%,但其窄带带宽比理论光谱小;石英晶振法的平均透射率接近 91%,但中心波长偏离了 905 nm;而光控-晶控监控法的透射光谱很好,通带的平均透过率接近 94%,且其透射率光谱与理论光谱基本重合,故光控-晶控监控法的光谱特性最好.

表 1 为 3 种监控方法监控的窄带滤光片的中心波长、半峰值宽度和峰值透射率的详细对比.

已知 905 nm 窄带滤光片具体指标要求为:中心波长  $905 \pm 2$  nm,半峰值宽度  $23 \pm 1$  nm,峰值透过率  $>85\%$ . 结合表 1,可知石英晶振法监控的窄带滤光片的中心波长不合要求;光电极值法监控的窄带滤光片

的半峰值宽度偏小;而对于峰值透过率,3 种方法都符合要求,但光控-晶控法监控的窄带滤光片的峰值透过率最高,综合 3 个技术指标,可知光控-晶控法光谱特性最好.

表 1 3 种方法监控规整膜系(905 nm 窄带滤光片)的详细指标对比

Table 1 The detailed index comparison of the film with quarter wave coatings(905 nm narrow band filter) monitored by three methods

Methods	Photo-electric	Quartz	P&Q
Central wavelength/nm	905	917	907
Full width at half maximum/nm	20	24	23
Peak transmittance	90%	92%	95%

为了更充分地说明光控-晶控法监控规整膜系(此处为 905 nm 窄带滤光片)的优势,使用优化函数来评价,即

$$f = \sum_{\lambda} [T_{\text{means}}(\lambda) - T_{\text{theo}}(\lambda)]^2 \quad (10)$$

式中,  $T_{\text{means}}(\lambda)$  表示 3 种监控方法所得的透射率曲线在各波长处的透射率,而  $T_{\text{theo}}(\lambda)$  表示理论光谱在各波长处的透射率.

基于图 4 的透过率曲线的光谱数据,计算出 3 种方法的优化函数值,见表 2.

表 2 3 种方法监控规整膜系(905 nm 窄带滤光片)的优化函数值( $f$ )

Table 2 The optimal function value ( $f$ ) of the film with quarter wave coatings(905nm narrow band filter) monitored by three methods

Methods	$f$
Photoelectric extreme value method	0.376
Quartz crystal oscillation method	0.125
Photoelectric-quartz controlled method	0.087

根据表 2 的优化函数值对比,可知光控-晶控法的优化函数值最小,故用光控-晶控法监控规整膜系(此处为 905 nm 窄带滤光片)的透射率光谱曲线最接近理想光谱.

### 2.2 非规整膜系实验及结果分析

同样地,用光学薄膜设计软件设计一个 21 层的非规整膜系的结构,即  $S/0.78H0.74L0.96H1.05L1.03H0.86L1.15H0.99L1.02H1.06L1.04H1.09L1.03H0.94L1.02H1.16L1.01H0.93L1.06H0.97L1.07H/A$ ,图 5 是在相同工艺条件下,分别为采用光电极值法,石英晶振法和光控-晶控相结合的方法(P&Q)监控 830 nm 长波通截止滤光片(截止 500~770 nm 的光,860~1100 nm 的光高透过率)成型过程所得到的透射率光谱.

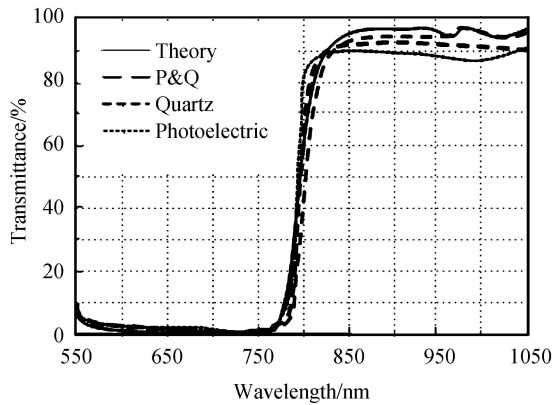


图5 3种方法监控非规整膜系(830 nm截止滤光片)膜厚的透过率曲线

Fig. 5 Theoretical and measured transmittance curves of the film with non-quarter wave coatings(830 nm cutoff filter) monitored by three methods

通过对比,可以发现在830 nm截止滤光片的透过波段,光电极值法监控的截止滤光片的平均透过率(只指通带处,下同)接近88%,石英晶体法监控的截止滤光片的平均透射率接近91%,而光控-晶控相结合的方法监控的截止滤光片的平均透射率接近94%,且透射光谱与理论光谱最为相近,故光谱特性最好。

通过表3对3种监控方法监控的截止滤光片的透过波段、最低透过率、中心波长和截止波段进行详细对比。

表3 3种方法监控非规整膜系(830 nm截止滤光片)的详细指标对比

Table 3 The detailed index comparison of the film with non-quarter wave coatings(830 nm cutoff filter) monitored by three methods

Methods	Photo-electric	Quartz	P&Q
Quotas			
Pass band/nm	830~1100	850~1100	860~1100
Minimum transmittance	87%	90%	93%
Central wavelength/nm	810	830	840
Cutoff band /nm	500~770	500~780	500~780

已知830 nm截止滤光片指标要求为:透过波段为860~1100 nm,最低透过率(只指通带处,下同)>90%,中心波长为830 nm±10 nm,截止波段为500~770 nm.结合表3,可知光电极值法监控的截止滤光片的最低透过率为87%,不合要求;石英晶振法和光控-晶控法监控的截止滤光片的各项指标都基本符合要求,但光控-晶控法监控的截止滤光片的最低透过率最高.综合4个技术指标,可知光控-晶控法光谱特性最好。

为了更充分地说明光控-晶控法监控非规整膜系(此处为830 nm长波通截止滤光片)的优势,使用式(10)优化函数来评价,基于图5的透过率曲线的光谱数据,计算出3种方法的优化函数值,得出的结果见表4。

表4 3种方法监控非规整膜系(830 nm截止滤光片)的优化函数值( $f$ )

Table 4 The optimal function value ( $f$ ) of the film with non-quarter wave coatings(830 nm cutoff filter) monitored by three methods

Methods	$f$
Photoelectric extreme value method	1.235
Quartz crystal oscillation method	0.478
Photoelectric-quartz controlled method	0.137

根据表4的优化函数值对比,可知光控-晶控法的优化函数值最小,故用光控-晶控法监控非规整膜系(此处为830 nm长波通截止滤光片)的透过率光谱曲线最接近理想光谱。

### 3 结论

本文采用光电极值法和石英晶体振荡法相结合的膜厚监控方法对制备的滤光片的透射率光谱曲线进行了监控.实验结果表明,在监控905 nm窄带滤光片(规整膜系)时,光控-晶控监控法各项指标都符合要求,且在曲线通带处获得的平均透过率值和峰值透过率值比光电极值法和石英晶振法获得的平均透过率值和峰值透过率值均提高了3%~5%;在监控830 nm长波通截止滤光片(非规整膜系)时,光控-晶控监控法各项指标都符合要求,且在曲线通带处获得的平均透过率值和最低透过率值比光电极值法和石英晶振法获得的平均透过率值和最低透过率值均提高了3%~6%.光控-晶控监控法监控的滤光片的光谱曲线与理论光谱基本吻合,光谱特性最好,符合理论预期.该方法适用于规整膜系和非规整膜系,解决了光电极值法在极值点处误差大且不适用于非规整膜系的缺点,也解决了石英晶振法不能直接测出光学厚度且灵敏度随薄膜厚度增加而下降的缺点。

#### 参考文献

- [1] HUA Xian-li. Optical thin film monitoring technology[J]. *Technology and Market*, 2013, **20**(11): 7-8.  
华显立. 光学膜厚监控技术[J]. *技术与市场*, 2013, **20**(11): 7-8.
- [2] ZHAN Mei-qiong, ZHANG Dong-ping, YANG Jian, et al. Thickness monitoring by quartz crystal oscillation for optical coatings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 585-587.  
占美琼, 张东平, 杨健, 等. 石英晶体振荡法监控膜厚研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 585-587.
- [3] ZHU Mei-Ping, YI Kui, GUO Shi-Hai, et al. Research of an automatic system monitoring thickness of optical thin film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 308-310.  
朱美萍, 易葵, 郭世海, 等. 光学薄膜膜厚自动控制系统的研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 308-310.
- [4] LEE C, WU K, CHENG C, et al. Improvement of the optical coating process by cutting layers with sensitive monitor wavelengths[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(13): 4854-4861.
- [5] QUAN Gui-qin, HAN Jun, MI Qian. A kind of improve design for system of optical thin-film thickness monitoring control based on the method of photoelectricity limiting value

- [J]. *Applied Optics*, 2002, **23**(4): 30-32.  
权贵秦, 韩军, 弥谦. 一种基于光电极值法的光学膜厚监控系统改进设计[J]. *应用光学*, 2002, **23**(4): 30-32.
- [6] LAI Fa-chun, WU Xiao-chun, ZHUANG Bin-ping, *et al.* Dual wavelengths monitoring for optical coatings[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(13): 9437.
- [7] LIAO Zhen-xing, YANG Fang, XIA Wen-jian, *et al.* The progress of optical thin film thickness monitoring[J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(4): 1012.  
廖振兴, 杨芳, 夏文建. 光学薄膜膜厚监控方法及其进展[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(4): 1012.
- [8] FU Lian-xiao, WU Yong-gang, ZHENG Xiu-ping, *et al.* Design and preparation of narrowband filter with central wavelength 121.6 nm in vacuum Ultraviolet region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2427-2428.  
付联效, 吴永刚, 郑秀萍, 等. 中心波长 121.6nm 的真空紫外窄带滤光片设计和制备[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2427-2428.
- [9] FU Jing-jing, MA En, LIN Li-jun, *et al.* Fabrication of edge filter on a testing system for infrared up-conversion materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(083102): 1-3.  
傅晶晶, 马恩, 林丽君, 等. 红外上转换材料测试系统中截止滤光片的研制[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(083102): 1-3.
- [10] LEE C C, WU K. In situ sensitive optical monitoring with proper error compensation[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(15): 2118-2121.
- [11] HAN Jun. Research on key technology in thin-film thickness wideband monitoring system[D]. Shanxi: Xidian University, 2011: 15-16.  
韩军. 光学膜厚宽带监控关键技术研究[D]. 陕西: 西安电子科技大学, 2011: 15-16.
- [12] CHENG De-jun, YANG YA-pei, FANG Man. A novel method for monitoring non-normalized coating system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(6): 37-40.  
陈德军, 杨亚培, 方曼. 一种监控非规整膜系的新方法[J]. *光电工程*, 2004, **31**(6): 37-40.
- [13] YANG Ya-sheng. Application of extremum method to monitor optical film thickness [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1989, **10**(2): 76.  
杨亚生. 光学薄膜膜厚监控中极值法的应用[J]. *半导体光电*, 1989, **10**(2): 76.
- [14] LI Zhan-feng, SHANG Li-ping. Film thickness on-line measurement method by quartz crystal differential [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, **22**(3): 99-100.  
李占锋, 尚丽平. 薄膜厚度的石英晶体差动在线测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2001, **22**(3): 99-100.
- [15] TANG Jin-fa, GU Pei-fu, LIU Xu, *et al.* Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University press, 2007: 260-263.  
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 260-263.
- [16] Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences. Optical controlled- crystal controlled integrated film thickness monitoring method: China, 103540906[P], 2014-01-29, 2.  
中国科学院上海光学精密机械研究所. 光控-晶控综合膜厚监控方法: 中国, 103540906[P], 2014-01-29, 2.
- [17] LI Shan. Study and Fabrication of 905nm Narrow Band-pass Filter[D]. Jilin: Changchun University of Science and Technology, 2010: 13-14.  
李珊. 905nm 窄带滤光片的设计与制备[D]. 吉林: 长春理工大学, 2010: 13-14.